

중-동 제주 수역의 지하수 개발로 인한 해수침투

Seawater Intrusion due to Ground Water Developments in Eastern and Central Cheju Watersheds

박남식(Nam - Sik Park)* · 이용두(Yong - Doo Lee)**

요 약 : 제주도는 예상되는 물 부족분을 충당하기 위하여 대규모 지하수 개발을 계획하고 있다. 효율적인 지하수 자원의 관리를 위해서는 개발에 대한 영향평가가 선행되어야 하는데 제주도에서는 지역의 특성상 해수의 영향을 고려해야 한다. 본 연구에서는 가상의 지하수 개발에 대한 중-동제주 수역의 해수침투의 반응을 해석하였다. 해석 방법으로는 담수와 해수의 동수역학을 동시에 고려하는 비확산 전산모형(sharp interface numerical model)을 이용하였다. 모델링에서 사용된 단계적 지하수 개발 일정은 제주도 광역상수도 개발 계획과 동일한 비율과 시간 간격에 따라 설정되었다. 모델링 결과 해수침투(saltwater wedge)는 지역에 따라 1km 이상 침투하는 것으로 예측되었다. 이러한 결과는 해수침투를 고정된 것으로 가정하여 담수의 흐름만을 고려한 모델링을 바탕으로 한 영향평가의 신뢰성에 의문을 가지게 한다.

Abstract : The Island of Cheju plans massive ground water development to meet predicted water demand. Effective management of ground water resources requires impact assessment study. Due to the nature of the island, effects of sea water must be considered. In this work, salt water intrusion, due to hypothetical ground water development in Eastern and Central Cheju Watersheds, is predicted using a sharp-interface model. The model considers simultaneously hydrodynamics of both freshwater and saltwater. The hypothetical ground water development was designed such that it follows closely the regional ground water development plan. The numerical model predicted that the saltwater wedge may intude over 1km depending on the location. This observation leaves doubt on impact assement studies based on freshwater-flow only modeling.

서 론

한반도의 남쪽에 위치한 제주도(Figure 1)는 국내에서 지하수 개발이 가장 활발하게 이루어지고 있는 대표적인 지역이다. 건설부 등(1993)이 조사한 제주도 수자원 현황(1991년 당시)에 의하면 총 수자원 이용량 552,000 m³/d 중 67.8%에 달하는 368,800 m³/d는 3,000여개의 관정에서 취수되며, 그 나머지는 대부분 용천수로 공급되고 있어 거의 전적으로 지하수에 의존하고 있다. 또한 향후 급증할 것으로 예상되는 물에 대한 수요를 충족하기 위하여 대규모 지하수 개발이 필요한 것으로 조사되었다(건설부 등, 1993). 중-동제주 수역은 제주도를 구성하는 16개 소수역 중 제주시의 대부분을 포함하는 두 개의 소수역(Figure 2)으로, 향후 15년에 걸쳐 현재 지하수 사용량의 2배 이상의 지하수가 추가 개발이 계획되고 있다. 두 수역의 면적은 약 170 km²으로 제주도 전체 면적 1,810 km²의 10.6%에 해당한다.

지하수 자원의 효율적인 활용과 오염으로부터의 보호를 위해서는 개발에 대한 영향평가가 필수적이다. 정량적 영향평가

를 위하여 수치모델들이 사용되는데 제주도에서는 둘레의 바다 때문에 담수의 흐름만을 고려하는 모델링으로는 신뢰성 있는 결과를 얻기 어렵다. 그러나 제주도 지하수 개발에 대한 많은 영향조사는 담수의 흐름만을 고려하였으며, 해수침투에 대해서 조사된 거의 모든 경우에도 수질조사 등의 기초조사와 해수의 동역학을 고려하지 않는 Ghyben-Herzberg가정을 이용한 분석에 그쳤다(김천수, 1992; 최순학, 1992; 윤정수와 박상운,



Figure 1. Cheju Island (after Ministry of Construction et al., 1993).

*동아대학교 토목공학과(Dept. of Civil Eng., Dong-a University, Busan 604-714, Korea)

**제주대학교 해양환경공학과(Dept. of Marine Environmental Eng., Cheju National University, Cheju 690-756, Korea)

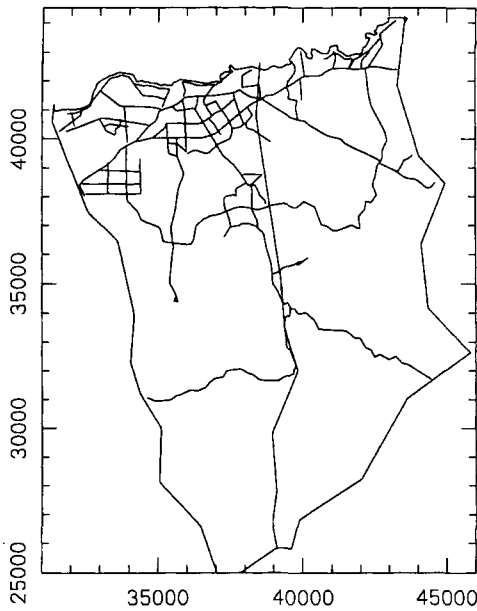


Figure 2. Eastern and Central Cheju Watersheds.

1994; 이기화, 1992). 이상호 등(1994)은 제주 북동부 지역의 해수침투 현상을 확산모델을 이용하여 해석한 바 있다. 그러나 고려된 모델링 영역의 크기가 0.6 km²에 불과하기 때문에 모델링 결과가 경계조건의 영향을 받을 수 있어 결과의 신뢰성에 의문의 여지가 있다.

본 연구에서는 담수와 해수의 동역학을 고려한 전산모형 SIMLAS(Sharp-interface model for layered aquifer system, Huyakorn, et al., 1996)를 이용하여 중-동제주 수역의 지하수 개발로 인한 지하수위 변화와 해수침투에 대한 예측 모델링을 수행하였다. 담수와 해수사이에는 용존고형물의 농도가 연속적으로 변하는 유한한 두께의 확산대(dispersed zone)가 존재한다. 이러한 확산대의 거동을 예측하려면 지하수 흐름식과 용질수송식(solute transport equation)으로 구성된 확산 모형(dispersion model)을 사용해야 한다. 그런데 용질의 농도는 지하수 밀도에 직접 영향을 미치며, 그로 인하여 두 개의 지배방정식은 연결되어 비선형연립 편미분방정식이 된다. 확산 모형에 대한 모델링은 용질수송식의 수치해에 대한 안정성(stability)조건을 만족시키기 위하여 매우 조밀한 격자망을 사용해야 한다. 따라서 소규모 유역에 적용하는 어려움이 없으나, 광역적인 유역에 적용시키는 데에는 여러 가지 어려움이 따른다(박남식, 1994).

확산대의 두께는 여러 가지 수리지질 특성에 따라 변하는데 문제의 규모에 비하여 확산대의 두께가 작으면 확산 모형의 대안으로 비확산 모형(sharp-interface model)을 사용할 수 있다. 비확산 모형은 담수와 해수사이 농도가 불연속적으로 변하는 경계(비확산대, sharp interface)가 존재한다는 가정하에 수립된다. 이 가정은 확산계수(dispersion coefficient)가 작거나(박남식, 1995), 확산계수가 작지 않아도 광역적인 관점에서 볼 때 확산대의 두께가 무시될 수 있으면 적용이 가능하다.

Table 1. Total ground water withdrawal rates (m³/d) in Cheju watershed (건설부 등, 1993)

수역	표 5-4	표 8-42
동제주	16,000	6,523
중제주	42,600	36,690
서제주	31,300	10,894
소계	89,900	54,107

중-동제주 수역의 지하수 개발

지하수 개발현황

1993년 당시 제주수역의 지하수 개발현황은 건설부 등(1993)의 보고서 두 곳에서 상이하게 보고되어 있다. 한 곳(표 5-4)에서는 89,900 m³/d로, 다른 곳(표 8-42)에서는 54,107 m³/d로 집계되어 있다. 그 중 중-동제주 수역의 개발량은 각각 58,600 m³/d와 43,200 m³/d로 제주수역 전체 지하수 개발량의 65%와 80%를 차지한다(Table 1). 본 연구에서는 예측 모델링 결과에 안전성(conservatism)을 부여하기 위하여 58,600 m³/d를 현재 개발량으로 취급하였다.

건설부 등(1993)은 중-동제주 수역에 680여개의 사설 및 관용관정이 개발되어 있는 것으로 보고하였다. 그러나 이중 관정 현황이 파악된 것은 관용관정 47개 공에 불과하다. 파악된 관용관정중 위치가 확인된 40개 공을 본 모델링에서 고려하였다(Table 2). 이 들 관정의 취수량 분포는 Figure 3에 도시하였다. 그림에서 원의 크기는 양수량에 비례하며 원안의 수는 Table 2의 번호와 일치한다.

Table 2에 수록된 40개 관정에서의 총 취수량은 50,850 m³/d이며 이는 중-동제주 수역 전체 취수량 58,600 m³/d의 86.8%이다. 따라서 모델링에서는 고려된 40개 관정에서의 총 취수량이 58,600 m³/d가 되도록 일정 비율로 각 관정의 취수량을 증가시켰다.

Figure 3의 취수량분포는 이 지역의 지하수 개발이 주로 중제주 수역의 해안으로부터 약 4 km 내륙에 집중된 것을 보여준다. 그러나 중제주 수역 서쪽경계에서는 해안에 인접한 지역에서 상당한 규모의 양수가 이루어지고 있어 그 관정에서의 해수침투 가능성이 높을 것으로 보인다.

지하수 개발계획

건설부 등(1993)은 향후 15년간 제주시 지역의 상수도 부족량을 약 178,200 m³/d로 추산하고, 이에 대한 수급대책으로 Table 3의 지하수 개발 계획을 제시하였다. 중-동제주 수역의 지하수 개발량을 제주 수역의 80%로 가정하면 중-동제주 수역의 2016년까지의 지하수 개발량 변화추이는 Figure 4와 같다. 지하수 개발이 완료되는 2011년에는 현재 개발량(58,600 m³/d)의 343%에 달하는 막대한 양이 된다.

비확산 모형

비확산 모형은 담수와 해수의 흐름을 나타내는 두 개의 흐름방정식으로 구성되는데 이들 역시 비선형연립 편미분방정

Table 2. Wells in Central and Eastern Cheju watershed

번호	공번	취수량(m ³ /d)	개발연도
1	D-216	1,000	89
2	제일중학교	450	88
2	제주동의중	480	88
2	중앙여고	320	87
2	이도공설	1,500	78
3	D-106	1,900	78
4	D-68	1,100	75
5	위생처리장	1,000	81
5	위생처리장	1,000	81
6	D-1	1,140	72
7	D-133	1,230	80
8	D-150	1,160	81
9	D-166	1,200	84
10	D-66	990	75
11	84-1	1,200	84
12	D-91	1,500	77
13	78-2	1,550	78
14	D-92	1,550	77
15	D-167	1,000	84
16	오라4호	1,550	78
17	오라5호	2,500	78
18	D-135	1,900	80
19	D-105	1,500	78
20	정실2호	1,200	84
21	D-76	1,550	76
22	W-17	900	71
23	D-112	1,600	78
24	D-117	1,800	79
25	D-77	900	76
26	D-127	1,230	79
27	D-13	1,500	72
28	W-5	1,500	70
29	D-126	1,900	79
30	83-1	1,100	83
31	아라 83-1	1,100	83
31	제주학원	800	88
32	D-204	1,000	87
33	D-109	1,550	78
34	W-27	1,050	71
35	D-58	1,800	74
총 40개소		50,850	

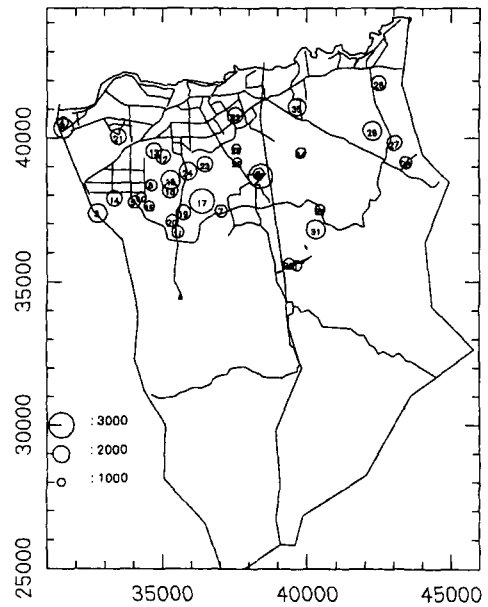


Figure 3. Distribution of ground water withdrawal rates in Eastern and Central Cheju Watersheds (as of 1993).

Table 3. Planned ground water withdrawal rates (m³/d) in Cheju watershed

연도	1996	2001	2006	2011	소계
개발주체					
지자체	40,000	0	0	0	40,000
건설부	37,284	44,983	31,237	24,705	138,209

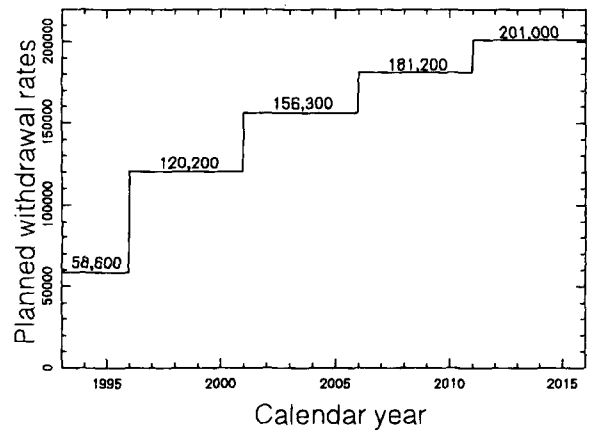


Figure 4. Planned ground-water withdrawal rates in Eastern and Central Cheju Watersheds.

식이지만 용질수송식이 포함되지 않으므로 안정성조건이 확산 모형에서 처럼 제한적이지 않다. 따라서 해수침투의 위험이 있는 경우 광역적인 지하수관리 모델링에 적합한 방법이라 할 수 있다.

비확산 모형은 두 개의 액체(담수와 해수)에 대한 흐름 방정식으로 묘사된다. 담수의 흐름에 대한 지배식은

$$\nabla \cdot (b^f \mathbf{K}^f \cdot \nabla h^f) = b^f S_f^f \frac{\partial h^f}{\partial t} - \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} - Q^f \quad (1)$$

로 주어지고 해수의 흐름에 대한 지배식은

$$\nabla \cdot (b^s \mathbf{K}^s \cdot \nabla h^s) = b^s S_s^s \frac{\partial h^s}{\partial t} + \theta \frac{\partial \xi}{\partial t} - Q^s \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 $\nabla (= \vec{i} \partial / \partial x + \vec{j} \partial / \partial y)$ 은 경사벡터(gradient) 연산자, \cdot 는 내적(inner product), 위치자 l 은 액체상(phase)으로 담수($l=f$)혹은 해수($l=s$), b^l 는 액체상 l 의 두께, $\mathbf{K}^l (= \rho^l g \mathbf{k} / \mu)$ 는 수리전도도텐서, ρ^l 은 밀도, \mathbf{k} 는 고유투수계수텐서, $h^l (= p^l / \rho^l g + z)$ 는 수두(hydraulic head), S_s^l 는 저류계수, θ 는 유효공극율, ξ 는 담수-해수 비확산대(sharp interface)의 표고, Q^l 는 sink/source를 나타낸다. 담수와 해수의 두께는 다음의 관계를

만족한다.

$$b^f + b^s = B \quad (3)$$

여기서 B는 포화층의 두께로 대수층의 상태(즉, 피압 혹은 비피압)에 따라 달라진다. 비확산대의 표고와 담수와 해수의 수두사이에는 다음 관계가 성립된다.

$$\xi = \frac{\rho^s h^s - \rho^f h^f}{\rho^s - \rho^f} \quad (4)$$

식 (4)는 비확산대에서 담수와 해수의 압력은 연속이라는 것을 의미한다.

위 식들은 Galerkin 유한요소법으로 이산화되고, 비선형성은 Newton-Raphson 방법으로 처리되었다(Huyakorn et al., 1996). 개발된 수치모형은 여러 가지 검증(Park et al., 1991; Park and Wu, 1994)과 대규모 유역에의 적용(Park et al., 1993)을 거쳐 그 정확성과 유용성을 입증받은 바 있다.

수치모델의 구성

수치모형실험을 수행하려면 먼저 대상 유역을 이산화(discretization)하고 유역의 경계에 적절한 조건을 지정해야 한다. 유역의 내부의 절점(node)들에는 투수계수, 공극율, 지하수 함양량, 대수층 바닥의 표고, 두께 등의 수리변수들에 대한 값들이 지정되어야 한다. 제주도에서는 지하수 개발이 활발하게 이루어진 해안 지역에서는 상당량의 자료가 조사되어 있다(건설부 등, 1993). 그러나 중산간 이상의 지역에 대해서는 조사된 자료가 거의 전무한 실정이다. 이러한 사정은 본 연구의 대상유역인 중-동제주 수역에서도 마찬가지이다.

이산화된 유역

본 연구에서는 중-동제주 수역의 담수-해수흐름에 대한 비확산 모델링을 위하여 유역을 30×50의 총 1,500절점으로 이산화하였다(Figure 5). 그러나 실제 모델링 유역인 중-동제주 수역에 포함되는 절점의 수는 999개이다.

경계조건

모델링을 위한 경계조건으로 해안에 위치한 절점에는 담수와 해수의 지하수위를 0 m로 지정하는 Dirichlet 경계조건을 사용하였다. 평균 1.4 m 정도의 조석간만 차이는 광역 지하수 흐름에 영향이 크지 않은 것으로 가정하여 무시하였다. 내륙의 경계에서는 불투수 경계조건을 사용하였다. 건설부 등(1993)에서 조사한 자료에 의하면 지하수위가 조사된 해안 지역에서는 등수위선들이 거의 수역의 경계에 수직이다. 이는 수역의 경계에서 지하수 흐름이 경계와 거의 평행하다는 것을 의미하므로 불투수경계는 합당한 경계조건이라 할 수 있다.

제주도의 주 대수층은 현무암층이다. 수치모델의 구성을 위해서 대수층 하부에도 경계조건이 지정되어야 한다. 동부지역을 제외한 나머지 지역에서는 현무암층 하부에 서귀포층이라 불리우는 퇴적층이 존재하는 것으로 알려져 있다. 한국수자원공사(1991), 원종호 등(1994), 박원배(1993), 윤선 등(1994), 농림

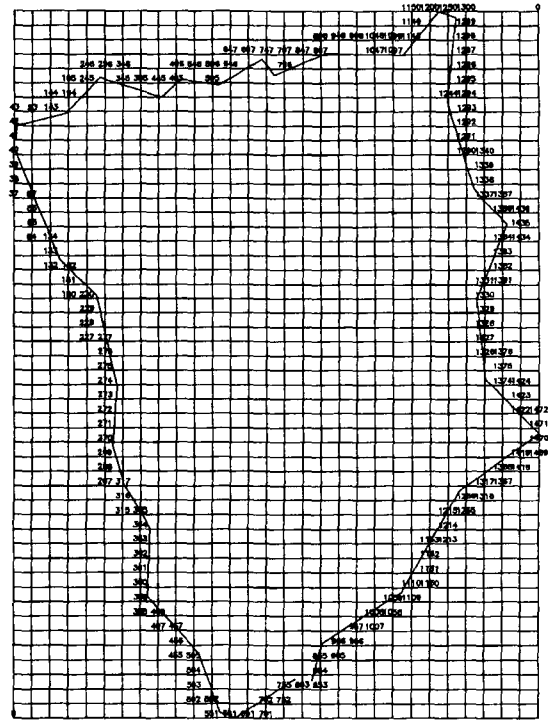


Figure 5. Discretized modeling domain and boundary nodes.

수산부 등(1991), 김성수(1991) 등은 서귀포층이 주 대수층보다 투수계수가 현저히 작은 난투수층의 역할을 한다고 주장하였다. 그에 반하여 Lee and Kim(1993)은 심부전기암사결과 제주 지역의 서귀포층이 불투수층이라는 어떠한 증거를 발견하지 못했다고 보고한 바 있다.

서귀포층의 투수성을 무시할 수 없다면 서귀포층 하부지층의 수리성이 중요해진다. 이에 관하여 수자원공사(1994)는 서귀포층 하부에 역시 난투수성인 응회암이 분포한다고 보고하였다. 이러한 경우 서귀포층의 투수성이 주 대수층보다 낮을 경우 서귀포층의 지하수는 주 대수층의 흐름에 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 본 연구에서는 서귀포층을 불투수층으로 취급하였다.

해안 지역에 대한 수리매개 변수

투수량계수분포는 건설부 등(1993)에 의하여 조사되었으며 그 분포는 Figure 6에 도시하였다. 그림에 나타나는 것처럼 투수량계수는 위치에 따라 최대 100배 정도의 차이를 보인다.

제주도에서 평균 지하수 함양율은 연 평균강수량 1,500 mm/yr의 40%에 해당하는 700 mm/yr로 추산되나 수역에 따라 약간의 차이를 보이는 것으로 조사된 바 있다(건설부 등, 1993, Table 7~9). 본 연구에서는 지하수 함양이 연중 일정 비율로 수역내에서 고르게 일어나는 것으로 가정하였다. Fracture porosity로 12.9%를 사용하였다.

중산간 이상 지역에 대한 수리매개변수

중산간 이상 지역의 수리지질자료에 대해서는 조사된 것이 전무하여 필요한 수리매개변수들의 값을 추정하였다. 중산간

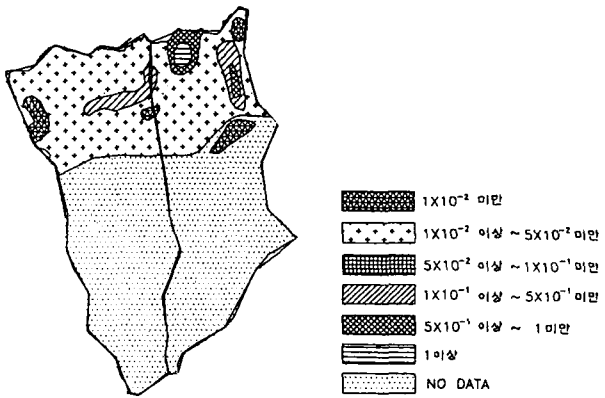


Figure 6. Distribution of transmissivity values (m^2/s) of the main aquifer system (FOB layer) in Eastern and Central Cheju Waterheds (modified after Ministry of Construction *et al.*, 1993).

지역에 대한 수리지질변수중 지하수 함양량은 해안 지역과 동일한 것으로 취급하였다. 투수량계수는 해안 지역에서 가장 광범위하게 분포한 것으로 조사된 0.01~0.05의 평균치인 $0.03 m^2/s$ 로 가정하였다. 그리고 현무암층 하부의 불투수층의 표고는 백록담 하부에서 600 m(농업진흥공사, 1989)인 것으로 추정하였다.

모델링

지하수 개발전 상태(1960년대)에 대한 모델링

전 절에서 소개된 여러 가지 자료들로 구성된 수치모델을 이용하여 유역내 지하수 개발이 미미했던 1960년대의 지하수 흐름에 대하여 모형실험을 수행하고, 개발전 상태의 관측된 지하수위(건설부 등, 1993, 그림 5-5)와 모델링 지하수위를 비교하여 입력 자료들을 보정하였다. 이 때 보정의 대상은 가장 불확실성이 큰 인자가 된다. 입력 인자들 중 투수량계수가 지하수 흐름에 미치는 영향이 가장 크고, 또한 일반적으로 다른 인자들(지하수 함양량, 대수층의 두께 등)에 비하여 상대적으로 불확실성이 크다. 따라서 투수량계수를 보정의 대상으로 하였다. 보정된 투수량계수의 분포는 원래 투수량계수 분포(Figure 6)와 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 기 조사된 투수량계수 분포의 신뢰도가 상당히 높은 것을 의미한다. 지하수 개발전 상태에 대한 관측 지하수위와 모델링 지하수위는 Figure 7에 도시하였다.

모의실험으로부터 얻어진 등수위선과 관측된 지하수위는 비교적 잘 일치한다. 물론 Figure 7에 나타난 전산모형의 결과는 투수량계수 혹은 다른 변수들의 추가적인 보정을 통하여 더욱 개선될 수 있다. 그러나 그러한 노력은 다음의 두가지 이유 때문에 불필요하다고 할 수 있다. 첫째, 관측자료는 측정오차 등 여러 가지 오차를 포함할 수 있으므로 그 정확성을 100% 보장할 수 없다. 둘째, 본 연구의 목적은 지하수 개발이 야기하는 지하수위 저하와 해수침투 정도를 예측하는 것이다. 이러한 영향은 상대적인 (지하수위 저하 = 현재 지하수위 - 미래 지하수위) 것이므로 보정된 현재 모형은 대상 유역의 지하수 환경에 미치는 상대적 영향을 예측하는 데에는 충분한 신뢰성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

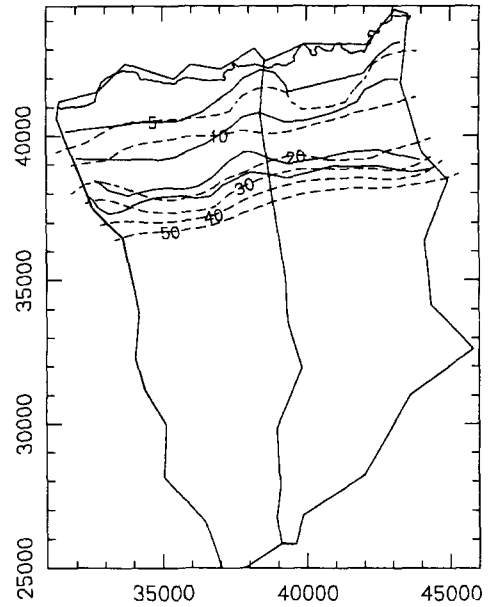


Figure 7. Comparison of observed (—) vs. simulated (- - -) potentiometric maps for the predevelopment condition (solid-line contour labels: 5, 10, 20, 30 m from the coastline).

지하수 개발 전 당시 해안 지역에서 비확산대의 toe(담수와 해수의 경계가 대수층 바닥과 만나는 지점)는 거의 해안선과 일치하였다. 따라서 개발 전에는 해수침투가 거의 일어나지 않았음을 의미한다. 이는 수역내 담수의 흐름이 충분하여 해수의 침투를 방지하고 있었던 것으로 보인다.

민감도 분석

본 연구에서 사용된 중산간 지역에 대한 수리지질변수들의 값은 부정확하다. 따라서 모델링 결과가 이 변수들의 불확실성에 얼마나 민감한지 조사되어야 한다. 이를 위하여 중산간 지역의 투수량계수로 0.003, 0.03, $0.3 m^2/s$ 를, 백록담 하부 불투수층의 표고로 600, 200, 0 m로 각각 3개 값을 선정하였다. 여기서 투수량계수는 해안 지역 투수량계수의 변화와 유사한 100배의 변화를 사용하였다. 조합으로 얻어지는 총 9개의 경우 중 $0.03 m^2/s$ 와 600 m는 기본 경우이므로 8가지 추가 경우에 대한 모델링을 수행하고 민감도 분석을 위하여 추가 경우에 대하여 얻어진 결과를 기본 결과와 비교하였다. 정량적 민감도 분석을 위하여 식 (5)로 정의된 수두변화를 사용하였다.

$$\Delta h^f = h_{base\ case}^f - h_{target\ case}^f \quad (5)$$

민감도 분석은 해안 지역 지하수 흐름의 반응과 중산간 지역 지하수 흐름의 반응에 대하여 별도로 수행하였다. 이는 해수침투와 계획된 지하수 개발 등이 해안 지역에 집중되어 있기 때문이다. 편의상 해안 지역을 지하수위가 50 m 이하인 지역으로 정의하였다. 모든 격자점에서의 수두변화를 통계처리하여 Table 4에 평균과 표준편차를 수록하였다. 가장 큰 변화는 투수량계수가 최소일 때 5 m 정도 수위가 상승한 것으로 나타났다. Table 4는 해안 지역 지하수 흐름이 중산간의 대수층 바닥 표고보다

투수량계수의 변화에 더 민감한 것을 보여준다.

수두변화의 평균치는 최소 0.6 m부터 최대 5.1 m까지의 분포를 보이나 대체적으로 2~3 m의 범위에 존재한다. 이러한 변화는 해안 지역의 지하수위가 0~50 m 범위에 이르는 것을 고려할 때 그다지 큰 변화가 아니므로 해안 지역의 지하수 흐름은 중산간 지역 수리변수의 불확실성에 그다지 민감하지 않다고 볼 수 있다.

비교를 위하여 해안 지역 투수량계수의 변화에 대한 해안 지역 지하수 흐름의 민감도를 분석하였다. 이를 위하여 기본 경우 투수량계수의 10배와 0.1배의 분포를 사용하였다. 이때 수두변화의 평균은 각각 13.4와 -50.5 m로 나타났다. 이 수치를 Table 4와 비교하면 중산간 지역 수리변수의 불확실성이 해안 지역 지하수 흐름에 미치는 영향은 그다지 크지 않다는 것을 알 수 있다.

중산간 지역 수리변수의 불확실성이 중산간 지역 지하수 흐름에 미치는 영향을 Table 5에 수록하였다. 표에 나타나는 것처럼 지하수 흐름은 매우 민감하게 반응한다. 그러나 해수침투가 일어나고 지하수 개발이 집중되는 해안 지역의 지하수 흐름에 미치는 영향이 작은 중산간 지역 지하수 흐름의 불확실성은 별 문제가 되지않는다.

수자원 총량의 개념인 담수부존량에 대한 추정치는 Table 6에 나타나는 것처럼 대수층 바닥의 표고에 따라 4.5억m³에서부터 40.5억m³까지 큰 변화를 보인다. 제주도 전체의 담수부존량에 대해서는 여러 연구결과가 발표된바 있다. 최소 75억m³(김영웅, 1990)에서부터 최대 2,000~3,000억m³(Lee, 1992)까지 연구자에 따라 큰 편차를 보인다. 건설부 등은 440억m³(윤정수와

박상운, 1994), 농어촌진흥공사는 650억m³(이강근, 1994) 등으로 추정하였다. 본 연구에서 얻어진 중-동제주 수역의 부존량을 면적비율(170:1,810 km²)로 제주도 전체에 확장시키면 기본 경우에 88억m³, 최대 430억m³으로 기 추정된 범위중 낮은 쪽에 해당한다.

예측모델링

Figure 4에 도시된 지하수 개발 계획에 대한 모델링에 대한 초기조건을 얻기 위하여 현재 지하수 상태에 대한 모델링을 수행하였다. 지하수 개발전 상태와는 달리 1960년 이후는 지하수 개발이 활발하게 이루어졌다. 현재 지하수 상태에 대한 모델링에서는 지난 30여년 동안 지하수 개발량이 현재 양수량과 동일하게 유지된 것으로 가정하였다.

총 양수량 58,600 m³/d를 적용하여 부정류 모델링을 수행한 결과 약 18년 후 유역내 지하수 흐름은 동적 평형상태에 도달하였다. 이는 제주도 주대수층이 자유면 대수층이지만 투수성이 매우 크기 때문에 지하수 흐름이 변화에 매우 빨리 반응하기 때문이다. 이는 본 유역 지하수 순환시간과 밀접한 관련이 있다. 본 연구에서는 상류의 지하수가 하류에 도달하는데 약 15년 정도의 시간이 소요되는 것으로 밝혀졌다. 안중성 등(1991), Choi and Kim(1989)은 환경동위원소를 이용하여 조사한 결과 제주도 지하수 순환시간이 매우 짧다는 결론을 내린 바 있다. 모델링 결과는 담수의 등수위선의 형태로 93년에 관측된 자료(건설부 등, 1993)와 함께 Figure 8에 도시하였다.

1960년 대 이후에 현재까지 활발히 진행되어 온 지하수 개발은 중-동제주 수역의 해수왜기의 위치에 그다지 커다란 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다. 다만 해안에 가깝게 위치한 관정의 영향을 받은 유역의 서쪽 해안 지역에서 toe의 위치가 내륙으로 약 1 km정도 이동한 것으로 나타났으나, 이 수치는 경계조

Table 4. Sensitivity of freshwater hydraulic head(m) of coastal area to changes in hydrogeologic parameters of upper mountain area: Average (Standard Deviation)

T (m ² /s)	Z _B (m)		
	600	200	0
0.030		0.6 (1.9)	0.6 (1.8)
0.300	3.2 (3.2)	2.9 (2.9)	3.8 (3.2)
0.003	-2.6 (3.0)	-5.1 (7.1)	-3.0 (5.2)

Table 5. Sensitivity of freshwater hydraulic head (m) of upper area to changes in hydrogeologic parameters of upper mountain area: Average (Standard Deviation)

T (m ² /s)	Z _B (m)		
	600	200	0
0.030		87.8 (83.6)	98.6 (98.7)
0.300	26.2 (15.8)	143.7 (100.4)	163.4 (130.8)
0.003	-138.6 (74.6)	-59.3 (49.4)	-46.0 (53.9)

Table 6. Estimated volume of freshwater in Eastern and Central Cheju Watersheds (10⁸ m³)

T (m ² /s)	Z _B (m)		
	600	200	0
0.030	8.3	15.4	21.3
0.300	4.5	7.9	12.5
0.003	26.6	35.1	40.5

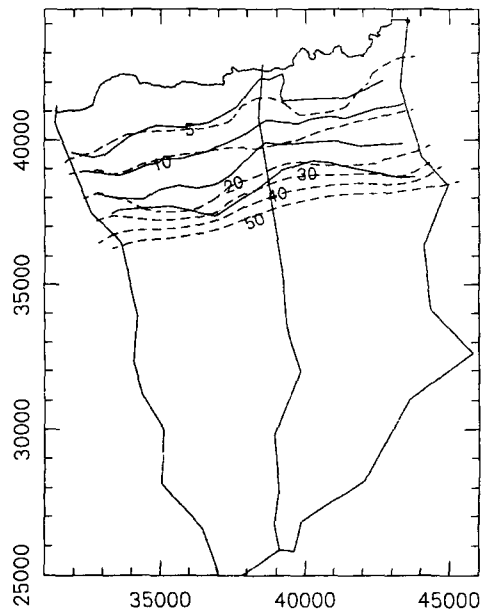


Figure 8. Comparison of observed (—) vs. simulated (---) potentiometric maps for the current condition (solid-line contour labels: 5, 10, 20, 30 m from the coastline)

건의 직접적 영향을 포함한다는 사실에 유의해야 한다.

모델링된 현재상태의 지하수분포에 Figure 4의 계획된 지하수 개발량을 적용하였다. 지하수 개발량은 기존관정의 취수량을 일정 비율로 증가시켜 유역내 총 개발량이 계획량과 동일하도록 설정하였다. 지하수 개발이 완료된 2011년 이후 5년이 경과한 2016년에 예상되는 지하수위 분포를 Figure 9에 도시하였다. 현재상태(Figure 8)와 비교하면 20, 30 m 등수위선의 위치에는 큰 변화가 없으나 5, 10 m 등수위선은 내륙으로 많이 이동한 것을 알 수 있다.

계획된 지하수 개발로 인한 지하수위 저하는 Figure 10에 도

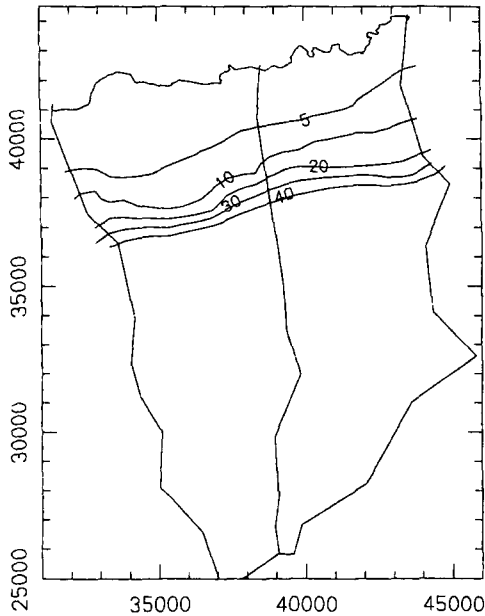


Figure 9. Predicted potentiometric map in 2016.

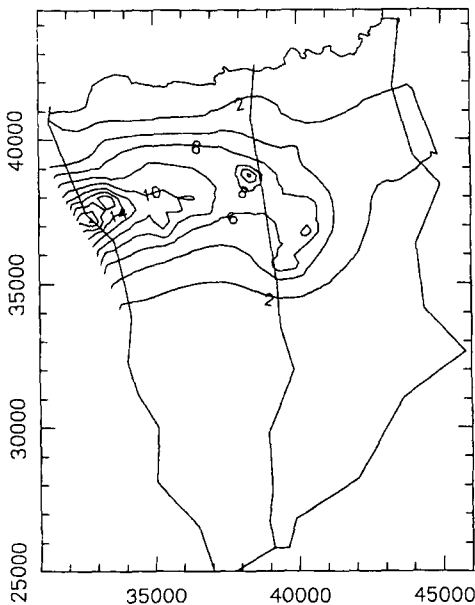


Figure 10. Predicted drawdown for 20 years: 1996-2016 (2 m contour intervals).

시하였다. 지하수위 강하분포는 Figure 3의 취수량 분포와 잘 일치하며, 최대 지하수위 강하는 서쪽 경계에서 약 20 m 이상인 것으로 예측되었다.

지하수 개발로 인한 담수 수두의 강하는 해수의 침투를 야기한다. 해수침투는 개발이 집중된 중제주 수역에서 뚜렷하게 나타났다. 동제주 수역에서는 2016년까지 toe 위치의 변화가 500 m 이내인 것으로 나타났으나, 중제주 수역에서는 위치 변화가 전반적으로 1 km 이상인 것으로 예측되었다. Figure 11에는 개발전과 현재(1996)부터 5년 간격의 toe 위치를 도시하였다. Figure 12에는 2016년에 예상되는 비확산대의 투시도(아래 쪽 그림)와 비확산대의 등고선을 투영면(위쪽 그림, $z = 100$ m)에 도시하였다. Figure 12의 위쪽 그림에서 나타나는 것처럼 2016년의 최대 침투거리는 약 2km, 비확산대의 기울기로 표현될 수 있는 지하수의 성층정도는 중제주 수역에서 심화되는 것으로 나타났다.

Figure 13에는 지하수 개발로 인하여 해안 지역에서 예상되는 해수층 두께의 증가를 도시하였다. 해수층의 두께가 가장 현저하게 증가한 곳은 역시 중제주 해안 지역으로 최대 30 m에 달하고 있다. 이는 해안 지역의 포화대수층 두께가 60여m인 점을 고려할 때 큰 변화라 할 수 있다. Figure 12의 해수-담수 비확산대는 평형상태에 도달한 상태가 아니다. 따라서 해수침투는 계

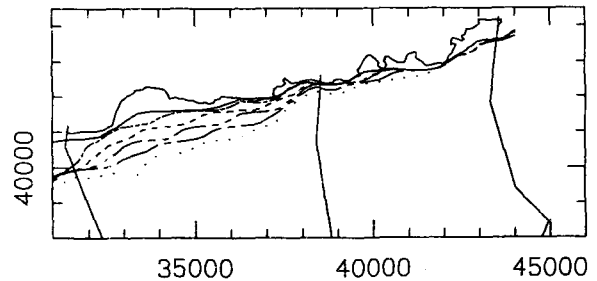


Figure 11. Expected locations of saltwater toe (—: predevelopment; - · - · - : 1996; - - - - : 2001; - · - · - · : 2006; - - - - : 2011; · · · · · : 2016).

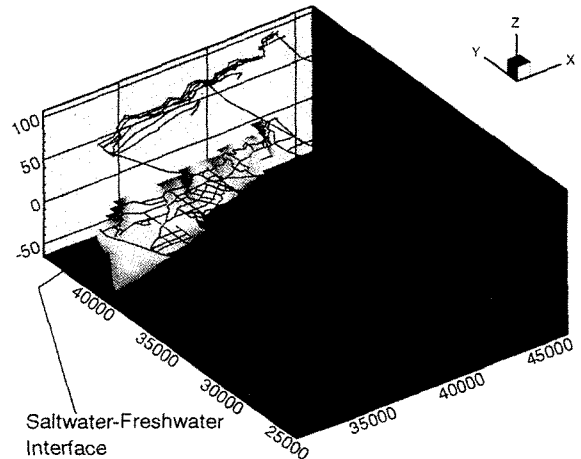


Figure 12. Predicted saltwater-freshwater interface in 2016 (upper: interface elevation contour lines (interval = 10 m); lower: perspective view of the interface).

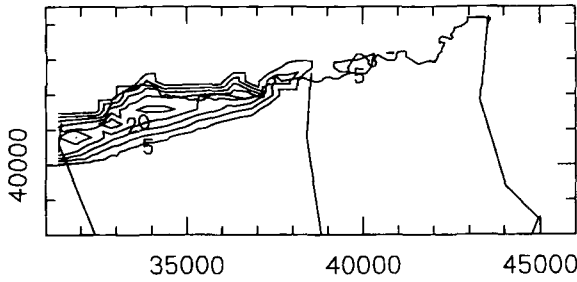


Figure 13. Increase of saltwater-zone thickness in 20 years: 1996-2016 (4 m contour intervals).

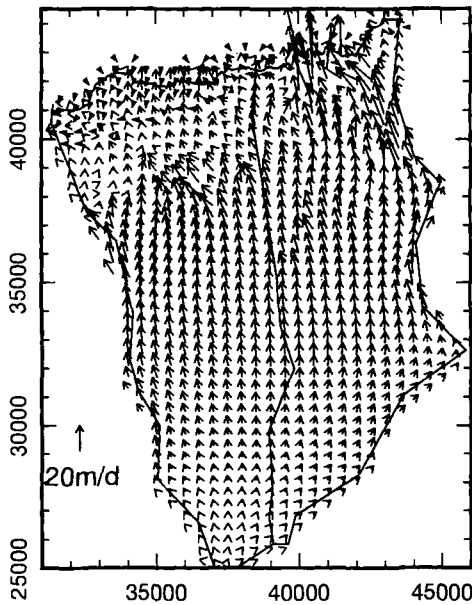


Figure 14. Saltwater (->) and freshwater (->) Darcy velocity vector fields.

속될 것으로 예상되며, 이 경향은 담수와 해수의 유속벡터를 도시한 Figure 14로부터 명확하게 드러난다. 전반적으로 해수의 유속은 담수의 유속보다 작지만 해안 지역에서 해수유동의 방향이 내륙 쪽이라는 것은 해수침투가 계속 진행되고 있다는 것을 의미한다. 흥미로운 것은 유역의 서쪽 경계에 위치한 4, 5번 관정(Figure 3) 주위에서 담수뿐 아니라 해수도 관정을 향해 흐르고 있다는 것이다. 이 관정들에서는 해수의 upconing 현상으로 담수뿐 아니라 해수도 유입되고 있으며, 유속벡터장도 이를 반영하는 것이다.

결론 및 토의

본 연구에서는 담수와 해수의 동수역학을 고려한 비확산 모형을 이용하여 중-동제주 수역의 광역상수도 개발 계획과 유사한 가상의 지하수 개발로 인한 지하수 흐름의 변화와 해수침투 가능성에 대하여 예측하였다. 그 결과 20년 후 중제주 수역의 서쪽 경계 부근에서 지하수위는 최대 약 20 m 정도 낮아지고, 해수는 중제주 수역에서 1 km 이상 침투하는 것으로 예측되었다.

위 결과는 계획된 지하수 개발이 수역 전체에 분포된다는 가

정하에 예측된 것이다. 그러나 실제 광역지하수 개발은 소수의 특정 지점에서 집중적으로 이루어지게 되므로 국부적인 지하수 위 강하와 해수침투 현상은 위 예측 결과보다 더욱 심각할 것으로 사료된다. 또한 확산효과 등을 고려하면 결과는 더욱 악화될 것이다.

따라서 제주도 수자원의 보존과 지속 가능한 개발(sustainable development)을 위하여 계획 채수량의 실제 분포에 대한 평가가 필요하다. 평가와 예측의 신뢰성을 높이기 위해서는 먼저 제주도 전체의 수자원에 대한 광역 수치모델의 개발이 선행되어야 한다. 이때 모델은 담수와 해수의 동역학을 고려할 수 있어야 한다. 이는 담수의 양수로 인한 해수침투 가능성에 대한 조사뿐만 아니라, 양식을 위하여 활발히 이루어지고 있는 해수의 양수가 담수의 흐름에 어떠한 영향을 미치는지도 정확히 평가되어야 하기 때문이다. 위와 같은 광역 지하수 모델링을 통하여 문제가 있을 것으로 예상되는 지역에 대해서는 확산을 고려하는 수질 모델링 등을 포함한 zoom-in 분석을 통하여 정밀 모델링을 수행하는 2단계 평가기법이 적용되어야 한다. 이러한 기법은 개발되고 있는 광역상수도 system의 수질 및 수량에 관한 최적 운영지침을 위해서도 필수적인 요소이다.

참고문헌

건설부, 수자원공사, 제주도, 1993, 제주도 수자원 종합개발계획 수립 보고서.

김성수 등, 1991, 제주도 수자원의 특성과 수질오염연구(II), 기본 연구사업의 보고서, 한국동력자원연구소 KR-9-(B)-10.

김양기 등, 1993, 93 장기관측망 설치 및 조사., 실적보고서, 농어촌진흥공사 제주지사.

김영용, 1990, 제주도의 지하수 부존과 해수침투, 1990년도 학술강연회 발표논문집(환경지질과 오염), 대한광산지질학회, p. 71-91.

김천수, 1992, 제주도 지하수환경의 오염취약성, 1992년도 제8회 공동학술강연회 발표논문집(지하수 자원의 활용과 보전), 대한광산지질학회, p. 13-28.

농업진흥공사, 1989, 제주도 지하수 장기개발계획 조사 보고서.

농림수산부 등, 1991, 제주도 장기관측망설치 및 조사 실적보고서.

박남식, 1994, 해수침투로 인한 지하수 오염: 수학적 모형들에 대한 비교검토, 대한토목학회 1994년도 학술발표회 논문집, 국립부산대학교, 147-150.

박남식, 1995, 수리변수들이 대수층 내의 담수-해수확산대의 형성에 미치는 영향에 대한 정량적 분석, 한국수자원학회 논문집, 28(2), 137-143.

박원배, 1993, 제주도 지하수의 수위변동에 관한 연구, 석사학위논문, 제주대학교.

안종성 등, 1991, 동위원소를 이용한 제주지역 수자원에 관한 연구(VIII), 연구 보고서, 한국원자력연구소 KAERI/RR-1036/91.

원종호 등, 1994, 제주도 수자원 부존 및 산출특성, 수자원 기술연구성과 발표문집, 한국수자원공사, p. 82-96.

윤선 등, 1994, 제주도 서귀포층의 지하분포상태와 지하수 부존특성과의 관계, 지하수 자원의 농업용수 활용방안과 수질보전 학술심포지엄, 제주도 수자원 연구회, p. 97-132.

윤정수와 박상운 1994, 제주도 지하수의 장기개발에 따른 문제점 고찰, 지하수 자원의 농업용수 활용방안과 수질보전 학술심포지

- 엄, 제주도 수자원 연구회, p. 59-96.
- 이강근, 1994, 지하수, 연세 대학교 환경공해 연구소 심포지엄 연재집: 물 2000년-물의 위기, p 25-49.
- 이상호 등, 1994, 해수의 지하수 침투 예측모형 개발, 수자원 기술연구성과 발표분집, 한국수자원공사, p. 97-112.
- 최순학, 1992, 지하수 자원보존 및 개발방향, 1992년도 제8회 공동학술강연회 발표논문집(지하수 자원의 활용과 보전), 대한광산지질학회, p. 97-114.
- 한국수자원공사, 1991, 북제주지역 수리지질계 분석에 관한 연구보고서, 보고서 91-50.
- Choi, S.-H., and Kim, Y.-K. 1989, Geochemical Characteristics of Groundwater in Cheju Island, Jour. Geol. Soc. Korea, 25(3), p. 230-238.
- Choi, S.-H., Kim, Y.-K., and Lee, D.-Y., 1991, Sea Water Intrusion in the Coastal Area of Cheju Volcanic Island, Korea, Jour. Korean Inst. Mining Geol, 24(3), p. 319-327.
- Huyakorn, P. S., Wu, Y. S., and Park, N.S., 1996, A multiphase approach to the numerical solution of sharp-interfaces saltwater intrusion problem, Water Resources Research, 32(1), p. 93-102.
- Lee, K.-H. 1992, On the Hydrodynamic Balance of Fresh and Salt Waters in the Cheju Island, Jour. Geol. Soc. Korea, 28(6), p. 649-664.
- Lee, K.-H., and Kim, H.-S., 1993, Deep Electrical Soundings in the Cheju Island, Jour. Geol. Soc. Korea, 29(1), p. 30-38.
- Park, N.S., Y.S. Wu, and P.S Huyakorn, 1991, Saltwater-Intrusion Model for Layered Aquifer System, prepared for Southwest Florida Water Management District, Florida.
- Park, N.S. and Y.S. Wu, 1994, Critical Evaluation of Vertical Leakage Techniques for Sharp Interface Approaches for Salt-Water Intrusion Problems in Multiple-Layer Aquifer System, Proceedings of the X International Conference on Computational Methods in Water Resources, Heidelberg, Germany, Kluwer Academic Publishers, p. 1027-1034.
- Park, N.S., P. S. Huyakorn, Y. S. Wu, and M. D. Barcelo, 1993, A sharp-interface saltwater intrusion code for layered aquifer systems, Proceedings of ASCE International Symposium on Engineering Hydrology, San Francisco, USA, p. 1159-1164.